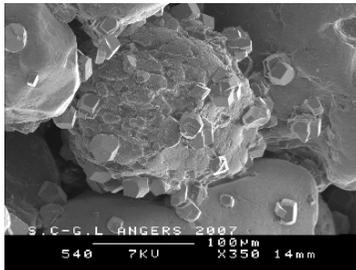
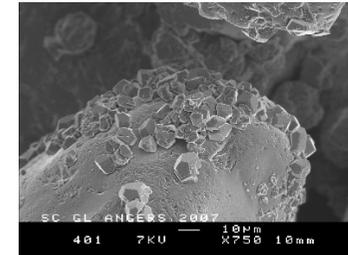




Journée technique du 25 janvier 2012
Techniques de construction durable



SOLETANCHE BACHY



**Développement de la technique de
biocalcification :
principes, historique et applications**

Annette Esnault Filet

annette.esnault@soletanche-bachy.com

BIOCALCIS : Procédé de renforcement de sol obtenu par précipitation de CALCITE par voie biologique



Stromatolites, Lac Thetis, Australie

« Quand de simples bactéries rendront les sols plus solides » 27/05/2007

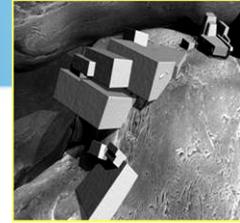
Le Monde

SmartSoils® - Soils on Demand

2nd Int. Workshop on Bio-Soil Interactions & Engineering, Sept.2011,
University of Cambridge, UK

« Scale up of BIOGROUT : a biological ground reinforcement method », 17th ICSMGE 2009

Du carbonate de calcium à la Calcite : *quelques définitions ...*



- La Calcite correspond à une forme cristalline précise du CaCO_3
- Le Carbonate de Calcium est le constituant principal de nombreuses roches sédimentaires : calcaires, marnes ; c'est un des carbonates les plus abondants.
- Le calcaire = roche qui contient au moins 75% de CaCO_3
- Formation NATURELLE des carbonates de calcium :
 - après précipitation chimique lors de l'évaporation des solutions riches en bicarbonate de calcium (par exemple, les concrétions naturelles des grottes stalactite et stalagmite).
 - après précipitation par voie bactérienne, selon différentes voies en fonction de la teneur en oxygène, en matière organique ou de la présence de lumière, etc
 - Dans la majorité des cas = combinaison des deux phénomènes Bactériens + chimiques (par exemple, les concrétions naturelles des grottes stalactite et stalagmite).
- En traitant un sable par biocalcification , le produit final
- obtenu s'apparente à un grès calcaire.



BIOCALCIS : Procédé de renforcement de sol par voie biologique

- Principe de précipitation de CALCITE par voie biologique est utilisé industriellement pour des applications en rénovation de façades de monuments historiques.
- Ce phénomène peut également être utilisé pour des applications de traitement de sable par injection.
- 2000s : These V.Whiffins + Brevet Université Murdoch – Institut Deltares NL
- Projet Biocalcis ANR RIB 2005

- **BIOCALCIS®** : développement du procédé par Soletanche Bachy pour la **consolidation des sols par injection**

...1980s

Eglise de St-Médard à Thouars (79). Aspect de la tour traitée en orientation Est.



Photo J-F Loubière, (Calcite Bioconcept.)

Application d'un traitement



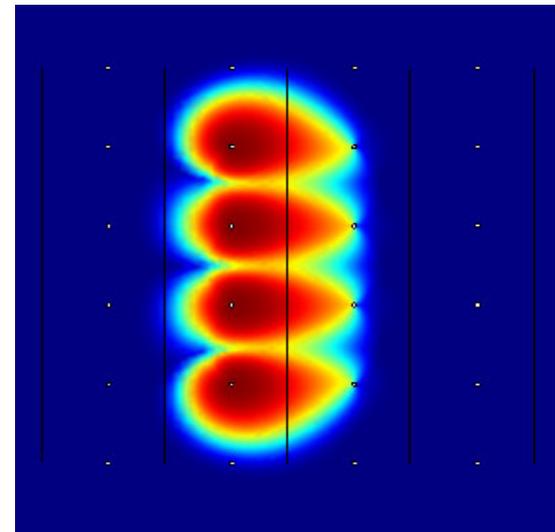
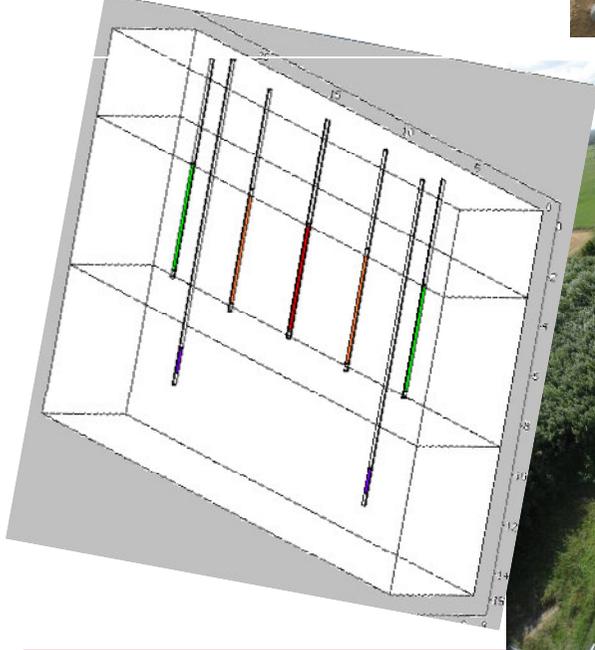
Photo J-F Loubière (Calcite Bioconcept).

Préparation du mélange biomérialisateur.



Photo J-F Loubière (Calcite Bioconcept).

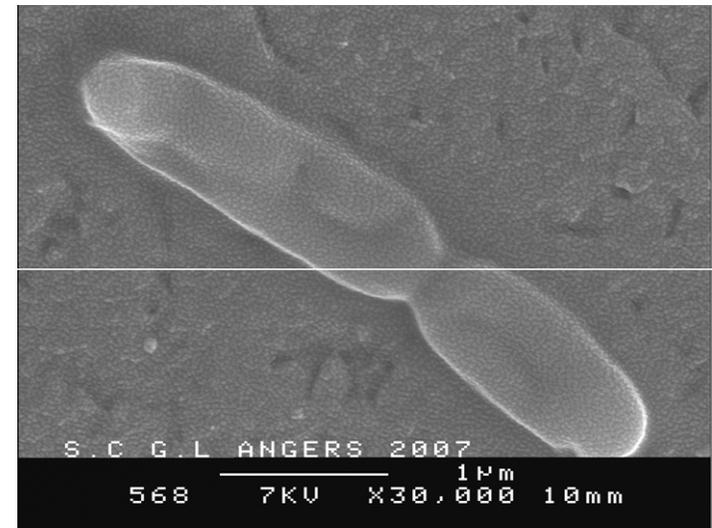
BIOCALCIS 2005-2012



Les injections de BIOCALCIFICATION ?????

La densité du maillage de forages d'injection par rapport à un traitement classique est réduite du fait de :

- La **dimension micrométrique** de la bactérie , qui permet d'injecter dans des sols fins,
- La **viscosité** de la suspension bactérienne est proche de celle de l'eau (**2 à 4 cP**),
- La notion de **Temps de prise** n'existe plus : la précipitation s'obtient par réaction des bactéries avec une solution nutritive calcifiante



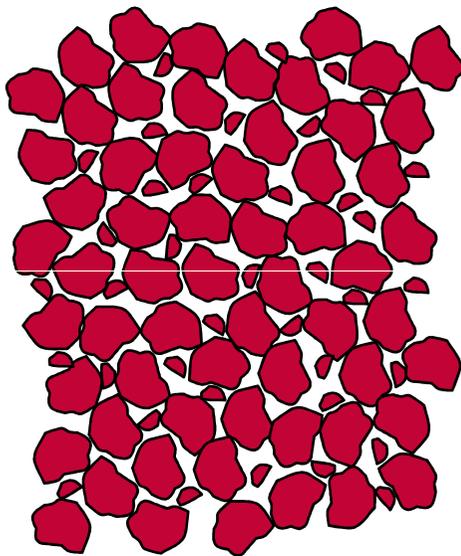
Sporosarcina .pasteurii

Injection sur des distances de plusieurs mètres

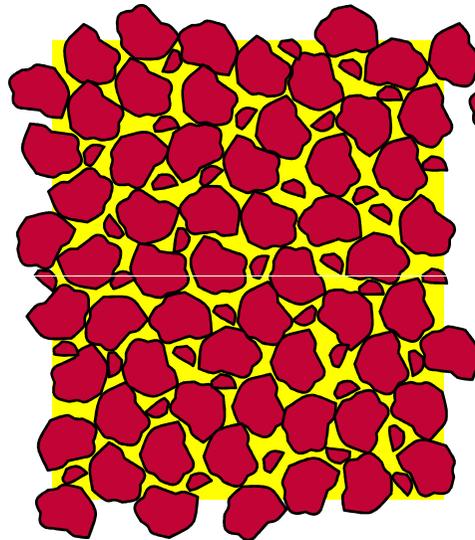
Calcification OBTENUE en quelques jours

Principe de répartition des produits d'injection dans le sol

Terrain naturel

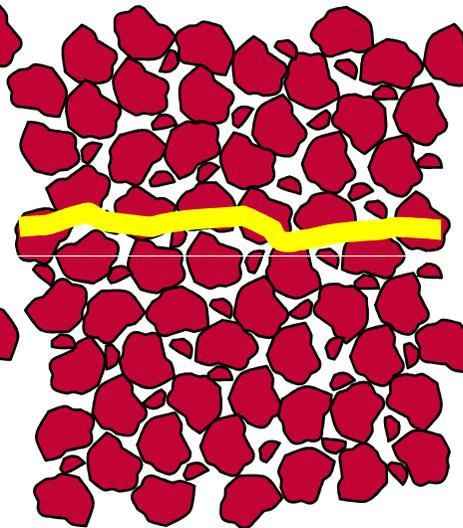


Injection par imprégnation



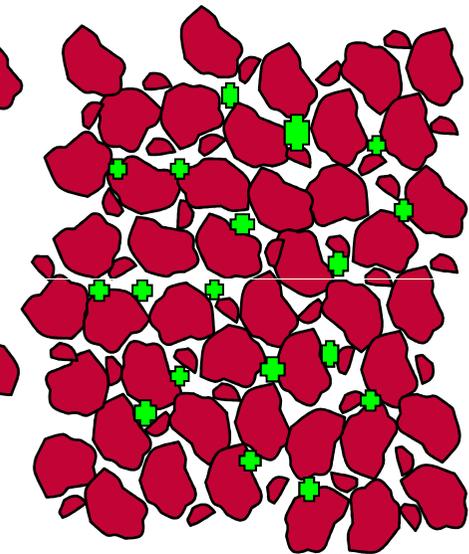
*Coulis fluide
Pression réduite*

Injection par claquage



*Coulis visqueux
Pression élevée*

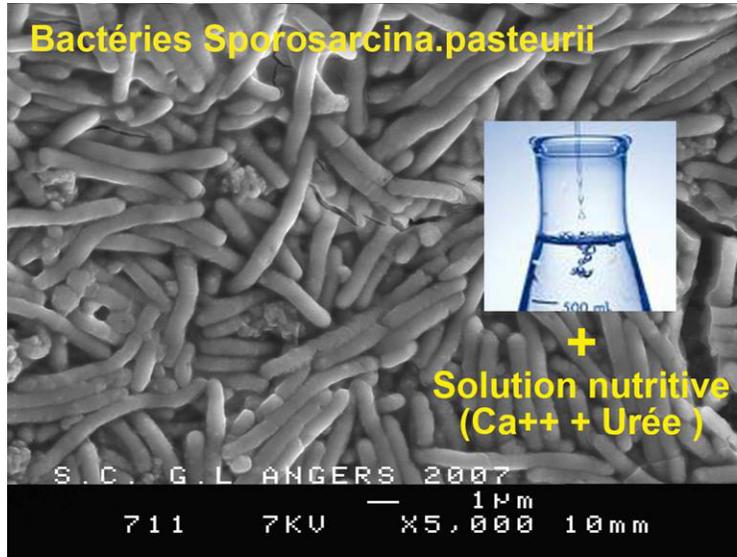
Injection par perméation



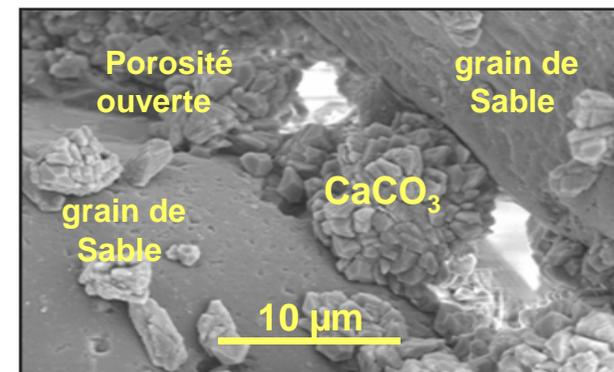
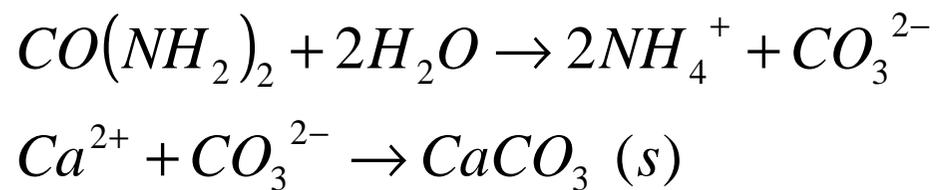
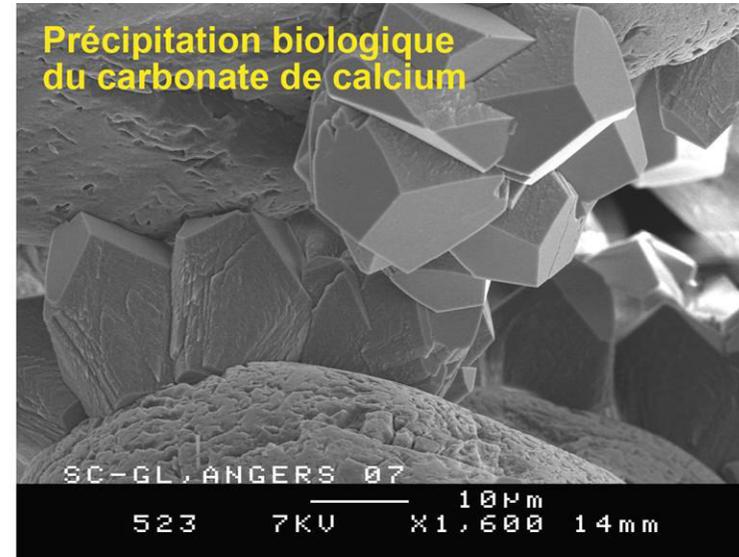
BIOCALCIS :
Ponts calcifiés entre les grains

Pas de modification de K

Principe de réaction

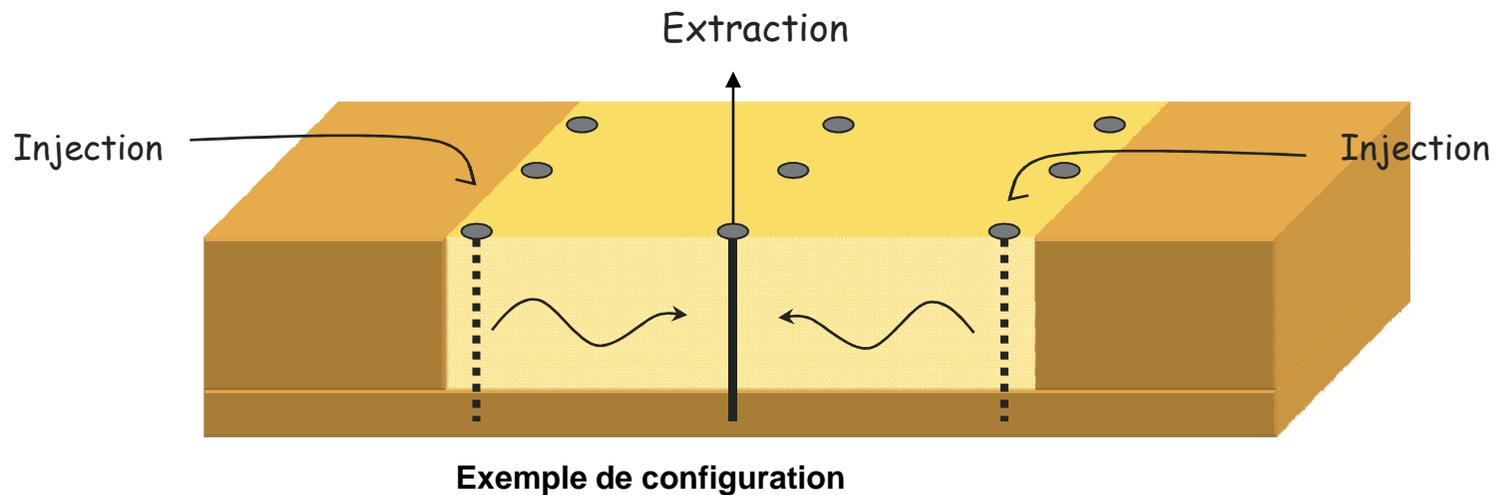


=



Le protocole de mise en oeuvre

1. Injection des bactéries
2. Temps de Repos de quelques heures pour la fixation des bactéries sur le sol
3. Injection du milieu calcifiant Urée / CaCl_2
4. Temps de Repos nécessaire à la réaction de bio-calcification (de 24 à 48h)
5. Extraction des co-produits



BACTERIES & *BIOMASSE*

Obtenue par ré-hydratation des bactéries en « poudre ».

Bactéries
lyophilisées



Concentration bactéries



Vitesse de réaction

Entre 0,2 et 100 mM/min

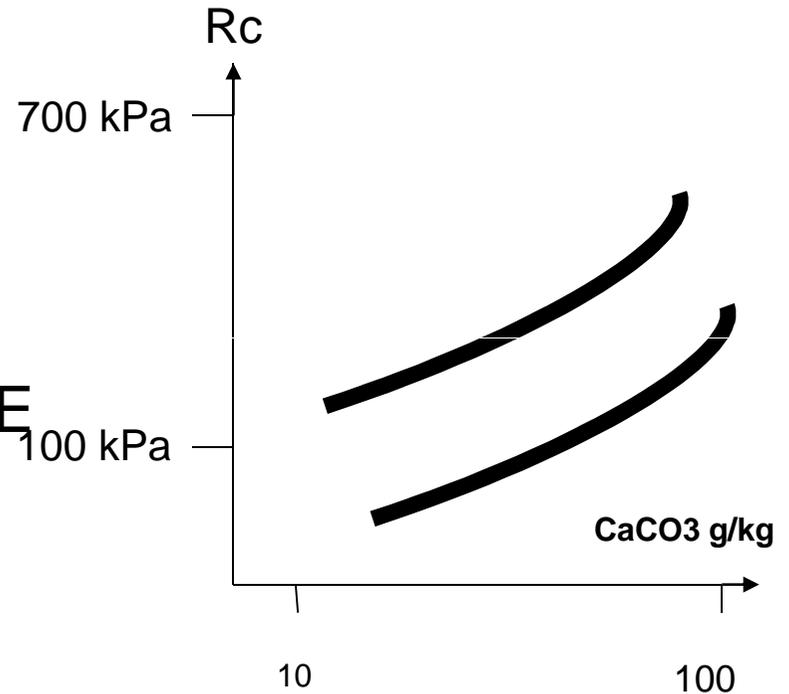


Solution Calcifiante

- Mélange Urée – Chlorure de calcium
- Equimolaire , gamme 0, 2 à 1,7 M

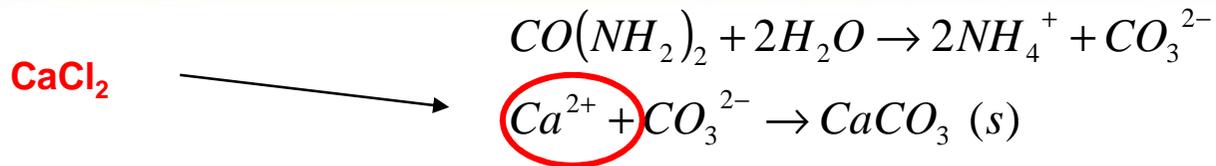


QUANTITE DE CALCITE
FORMEE : R_c



Etape	Biomasse	Eau	SC 0,5M	SC 0,2M
Débit moyen (m3/s)	8.70E-07	4.74E-07	7.71E-07	8.30E-07
Pression moyenne (mbar)	165.35	149.08	193.48	217.71
Densité du liquide	1.0000	1.0000	1.0441	1.0164
Perméabilité (m/s)	1.49E-04	9.01E-05	1.08E-04	1.06E-04

Solution Calcifiante & Produits de réaction



- CaCO_3 : de l'ordre de 2 à 5 % de la masse traitée
- $\text{NH}_4^+ + \text{Cl}^- \text{ ===== } \text{NH}_4\text{Cl}$

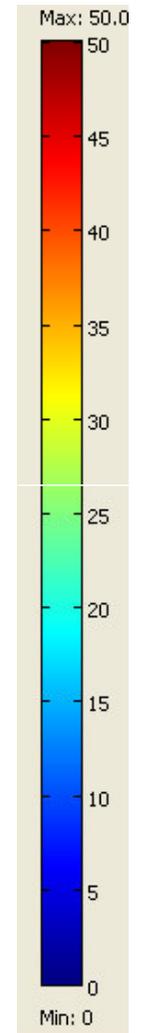
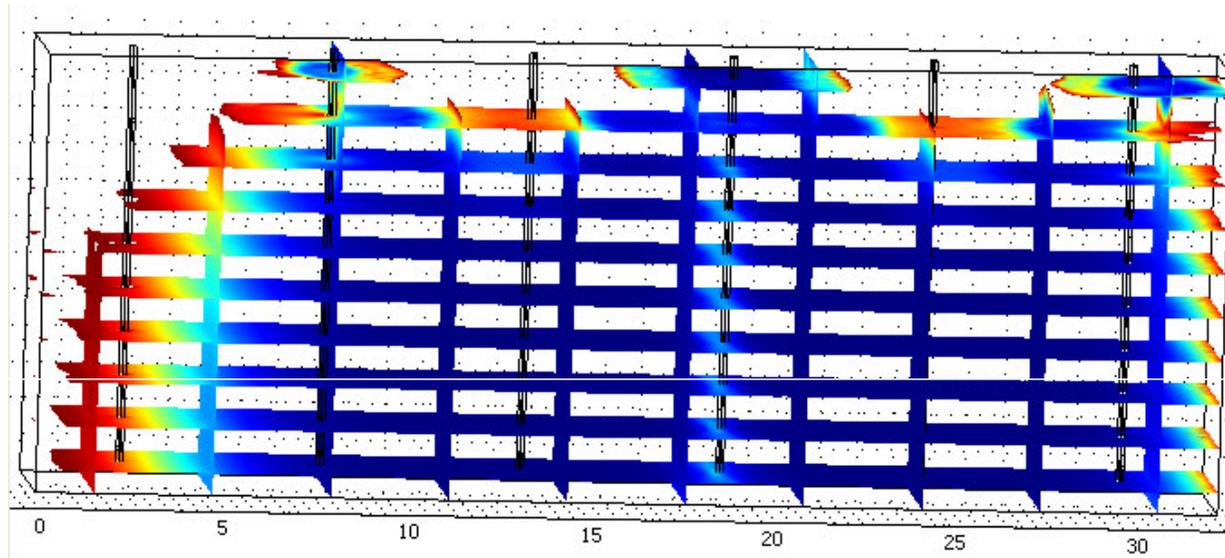


Chlorure d'ammonium

sera **extrait** du sol de façon à garantir une fraction résiduelle sans impact sur le milieu

Intégré dans procédé SB, avec possibilité de recyclage des eaux pour la préparation des bactéries
(brevet janv. 2012)

Dimensionnement du procédé



Modélisation sous COMSOL :

- Optimisation du maillage des puits et du phasage

LES CONTRÔLES

- Pendant la mise en œuvre : prélèvements échantillons dans des piézomètres , pour des analyses spécifiques à la bio-calcification (concentration bactéries, avancement de la réaction)
- Après traitement :
 - **Campagnes d'essais géotechniques**
 - Pénétrètres statiques
 - Prélèvements d'échantillons
 - Essais Géophysique
 - Etc.
 - **Campagne d'essais de laboratoire**
 - essais de cisaillement
 - résistance mécanique, essais triaxiaux
 - Dosages CaCO₃,
 - Observations MEB



Les principales caractéristiques de BIOCALCIS

- Destiné à l'injection d'une large gamme de perméabilités (y.c. sables fins à très fins $K 10^{-4}$ à $^{-5}$ m/s)
- Injection en 3 phases successives : bactéries – solution calcifiante - flush

Sur Sable type Fontainebleau :

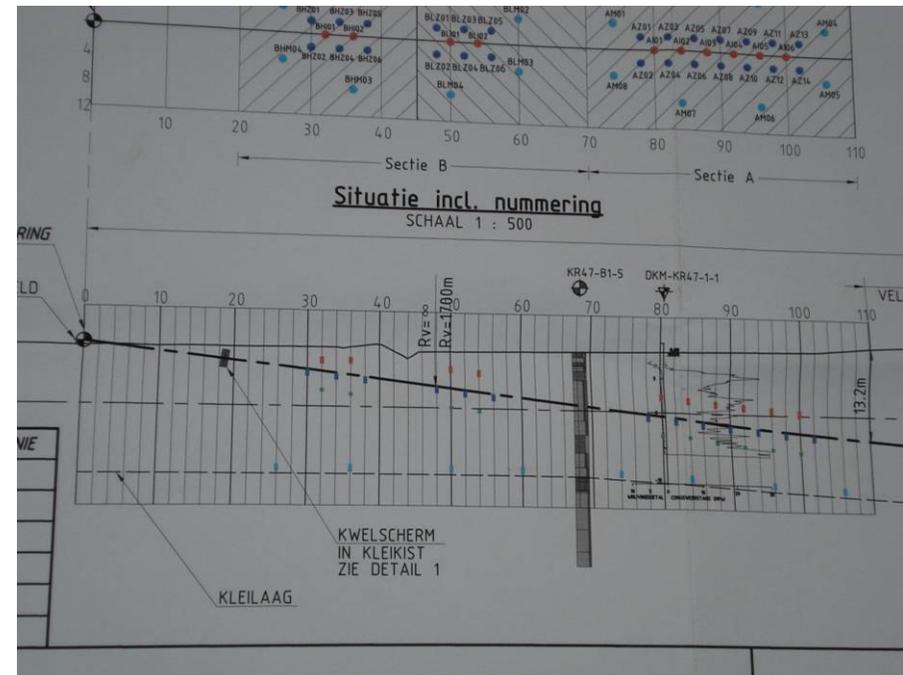
- Résistance mécanique min. : de l'ordre de 50 à 250 KPa
- Augmentation de la cohésion après traitement : jusqu'à 70 KPa
- Angle de frottement inchangé après traitement
 - Pas de changement significatif de la perméabilité
 - Temps de réaction très court (24 à 48h)
 - Maillage d'injection très lâche

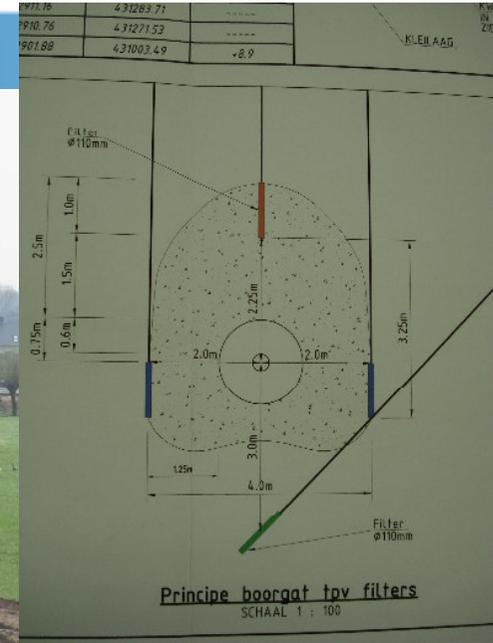
Les Applications typiques de Biocalcis

- Lutte contre la liquéfaction des sols
- Traitement contre l'érosion interne de dunes, digues, talus ...
- Renforcement du sol afin d'augmenter le tirant d'eau de quais existants
- Augmentation de la stabilité de barrages et de digues
- Renforcement du sol sous les structures sensibles aux vibrations
- Etc

BEUNINGEN – Hollande (chantier VSF –BIOGROUT)

Amélioration sols par Bio-calcification, pour le passage d'un Gasoduc
(Avril 2010)





www.vshanab.nl



PREVENTION LIQUEFACTION SOUS DES STRUCTURES INDUSTRIELLES (RESERVOIRS STOCKAGE PDTS CHIMIQUES)

- **Contexte : site industriel – Points particuliers importants:**
 - - réservoir fondé sur pieux
 - - présence éventuelle des poches limoneuses
 - - plateforme de travail sous hauteur réduite (1.8m)
 - - réseaux enterrés (EP, électrique, gaz, ...), etc ...

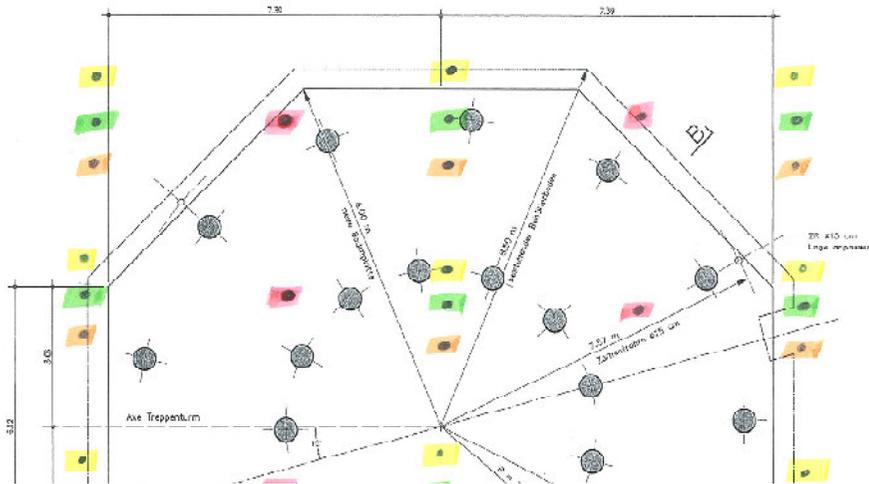
Caractéristiques des sols pour les calculs (sondage CPTu6)

terrain	cote haut	K h (m/s)	Kh/Kv	n
Remblais	0	1.10 ⁻⁴	1	-
Aluvions modernes	-0,5	1.10 ⁻⁵	5	0,4
Alluvions anciennes	-9,5	1.10 ⁻⁴	1	0,38

Solution de base proposée : « quadrillage » jet grouting + trench mix

Solution variante : traitement de la couche liquéfiable sous le réservoir par Biocalcis – Rc 200 kPa

PRINCIPE DE TRAITEMENT ANTI LIQUEFACTION



- Dimensions du volume de traité:

- Largeur: 16m
- Longueur: 16m
- Profondeur: 6m - 3.5 TN à 9.5 TN
- Volume de sol traité: 1536 m³

. Traitement du 1er plot

- Injection des bactéries : 11h
- Batch 7h
- Injection de la première solution calcifiante: 10h
- Batch 24h minimum
- Injection de la deuxième solution calcifiante: 10h
- Batch 35h minimum

ERROR: ioerror
OFFENDING COMMAND: image
STACK: